

大型ボールミル用耐摩耗鑄鉄の研究開発（平成25年度 プレ共同研究成果）

著者	春日 宏之，清水 一道，楠本 賢太
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	25
ページ	31-35
発行年	2015-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008984

大型ボールミル用耐摩耗鑄鉄の研究開発（平成25年度 プレ共同研究成果）

著者	春日 宏之，清水 一道，楠本 賢太
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	25
ページ	31-35
発行年	2015-02
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008984

大型ボールミル用耐摩耗鋳鉄の研究開発

春日 宏之^{*1}, 清水 一道^{*2}, 楠本 賢太^{*3}

1 はじめに

粉粒体の衝突により材料表面が損傷、除去される現象をエロージョンと呼ぶ。この現象は、粉体の固気二相流による輸送系でのパイプベンド部やバルブ、タービンブレード、ファン等において生じている。鉱山等で使用される大型ボールミルは、鋳鉄等の粉砕媒体による衝撃や摩耗により対象物を粉砕する。その衝撃により、粉砕媒体であるボール及びミル内壁が著しく摩耗する。特に摩耗の激しいミル内壁のライナーについては交換期間が短く、ランニングコストの増加、工場稼働率の低下などが問題となっている。稼働率の向上及びコスト削減の観点から、余寿命の推定、耐摩耗材料の開発が喫緊の課題となっている。現在、球状バナジウム炭化物鋳鉄や多合金鋳鉄が耐摩耗材料として広く使用されている。これらの耐摩耗材にはレアメタルであるクロム(Cr)、ニッケル(Ni)、モリブデン(Mo)、バナジウム(V)、タングステン(W)等が添加されており、高コストである。各合金元素の価格推移を見るとレアメタルの価格¹⁾は安定していない。特にフェロバナジウム(Fe-V)とフェロクロム(Fe-Cr)に着目するとFe-Crは価格変動が小さく価格が安定しているのに対し、Fe-Vは2005年に価格が高騰し、以後価格変動が大きい。このレアメタルの添加を抑えた合金を開発し、利用することで希少な合金元素の保持が可能になり、生産・製造コストの低減が可能である²⁾。

これまでの研究において高硬度な球状のバナジウム炭化物(VC)を晶出させることで粒子衝突時の応力を分散でき、材料表面の塑性変形を抑制し、耐摩耗性が向上することを明らかにしている³⁻⁵⁾。

本研究では、比較的安価なCrを添加した鋳鉄を基本

組成とし、Vを添加させることで複数の炭化物を晶出および析出させ、耐エロージョン摩耗特性向上に寄与するの調査した。

2 供試材および実験方法

2.1 供試材

供試材はマンガン(Mn)の添加量を4mass%とし、Vの添加量を5, 7.5および10mass%、Crの添加量を0, 4.5および9mass%と変化させた9種類のFe-C-Mn-Cr-V系多合金鋳鉄である。目標組成に配合した各原材料50kgを高周波誘導炉にて2023Kで溶解した。溶解した溶湯をサンドイッチ法にて球状化処理を施した後、53×53×125(mm)の実体部と押湯部からなる砂型に鑄造して製作した。摩耗試験に用いた試験片は50×50×10(mm)の平板状に鑄放状態のインゴットから機械加工した。また、試料表面を#2000まで研磨して摩耗試験面(表面粗さ: Ra0.8)とした。比較材として一般的な耐摩耗材料である高クロム鋳鉄(12Cr, 17Cr)を用いた。供試材および比較材の化学組成をTable 1に示す。

Table 1 Chemical composition of test specimens.

	(mass%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	V	Fe
12Cr	3.24	0.70	0.97	0.019	0.009	11.49	-	Bal.
17Cr	3.14	0.77	0.79	0.020	0.009	16.44	-	Bal.
5V-0Cr	3.48	1.03	4.24	0.064	0.018	-	5.22	Bal.
5V-4.5Cr	3.31	1.08	4.14	0.046	0.013	4.60	5.28	Bal.
5V-9Cr	3.26	1.09	3.97	0.041	0.012	9.09	5.27	Bal.
7.5V-0Cr	3.33	1.02	4.41	0.094	0.032	-	7.42	Bal.
7.5V-4.5Cr	3.11	1.05	4.12	0.054	0.008	4.31	7.34	Bal.
7.5V-9Cr	3.11	0.98	4.11	0.046	0.015	9.08	7.50	Bal.
10V-0Cr	3.23	0.99	4.02	0.089	0.026	-	9.87	Bal.
10V-4.5Cr	3.00	1.06	3.92	0.049	0.011	4.37	9.14	Bal.
10V-9Cr	3.10	1.05	3.99	0.041	0.010	9.10	9.49	Bal.

2.2 組織観察

光学顕微鏡, エネルギー分散型X線分析装置(EDS), X線回折(XRD)を用いて金属組織の観察を行った。金属組織を調査する試料の腐食液として3%硝酸アルコ

*1: 東洋鉄球株式会社

*2: もの創造系領域機械工学ユニット

*3: 物質工学専攻

ール溶液(ナイタル), ピクリン酸を用いた。EDS 分析には, タングステンフィラメントを用い, 加速電圧 20kV にて実施した。X 線回折(XRD)は, Cu 管球を用い, 40kv-20mA の条件で 2θ を 40~150deg. の範囲で行った。試料台に取り付けた試験片に 0.3×5mm の X 線ビームを照射し, 回折チャートから得られた回折ピークを基に炭化物の同定を行った。

2.3 硬さ測定

金属組織観察用試験片を用いて 490N でビッカース硬さを測定した。また, 試験後の硬さは摩耗表面から 50 μ m の位置に圧痕中心部がくるようにマイクロビッカース硬度計を使用し荷重 9.8N で測定した。

2.4 炭化物の面積率測定

金属組織観察用試験片を用いて, 各供試材の組織写真を計 5 視野撮影し, 画像処理を行い二値化して算出した。その際, 共晶炭化物は SEM にて 400 倍で組織写真を撮影した。

2.5 エロージョン摩耗試験方法

実験には吸引式ブラストマシンを使用した。使用した試験機の概略図を Fig. 1 に示す。衝突粒子は平均粒径 770 μ m, 硬度 810HV1 で不定形のスチールグリットとし, 試験ごとに新しいものと交換した。使用した衝突粒子の SEM 像を Fig. 2 に示す。空気流速は約 100m/s, 粒子噴射量は約 20.0g/s とした。衝突角度は任意に角度を変えることのできる治具を用い 30deg., 60deg. および 90deg. の 3 水準とし, 1 回の試験時間は 3.6ks とした。一定時間毎に摩耗試験前後で試験片の質量を電子天秤(測定精度 0.1mg)で測定し, その差(摩耗減量)から摩耗体積を算出し摩耗量とした。なお, 摩耗量の評価には各供試材の密度が異なるため損傷速度⁶⁾ (Erosion rate)を用いた。損傷速度は, 被衝突材の摩耗量を衝突粒子の総噴射量で除したものである。

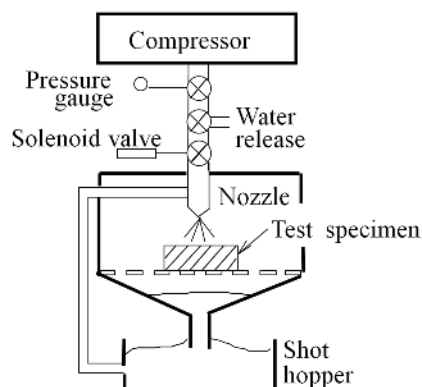


Fig. 1 Outline of the blast machine.

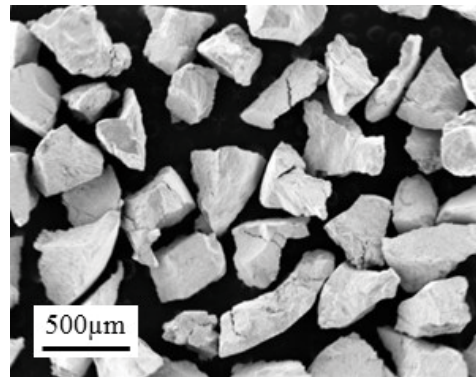


Fig. 2 SEM image of irregularly shaped steel grits.

3 試験結果

3.1 金属組織観察

Fe-C-Mn-Cr-V 系多合金鑄鉄の組織写真を Fig. 3 示す。各種 Fe-C-Mn-Cr-V 系多合金鑄鉄に共通して球状炭化物が観察された。また, Cr 含有量の増加に伴い, 針状もしくはラメラ状の炭化物が観察された。基地組織は, Cr 含有量の増加に伴い全体的に白い基地組織となった。

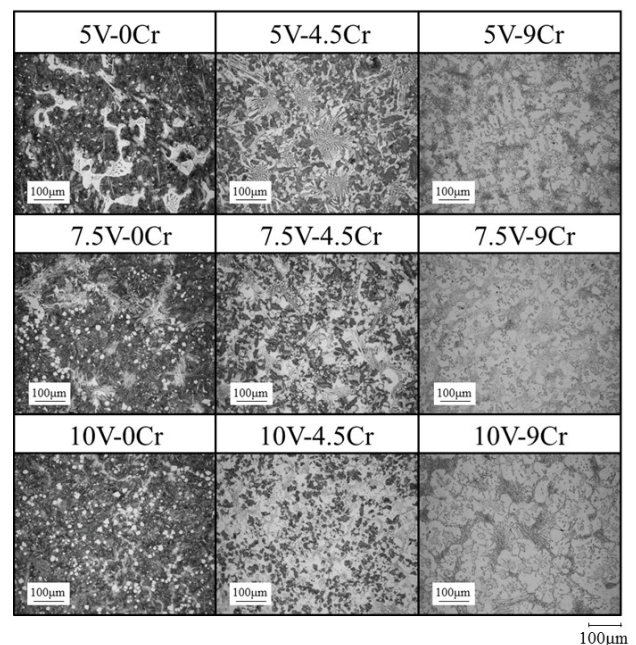


Fig. 3 Microstructure of specimens.

3.2 硬さ測定

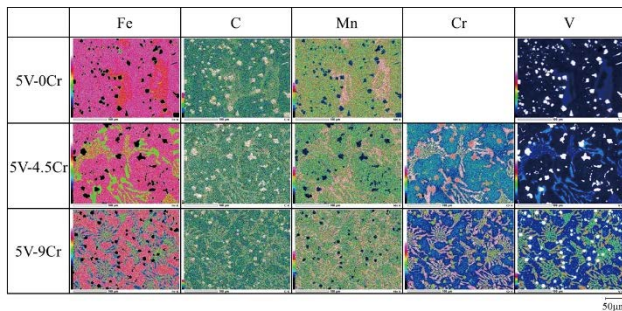
Fe-C-Mn-Cr-V 系多合金鑄鉄のビッカース硬さを Table 2 に示す。各種 Fe-C-Mn-Cr-V 系多合金鑄鉄は約 500~600HV50 であった。

Table 2 Hardness of specimens.

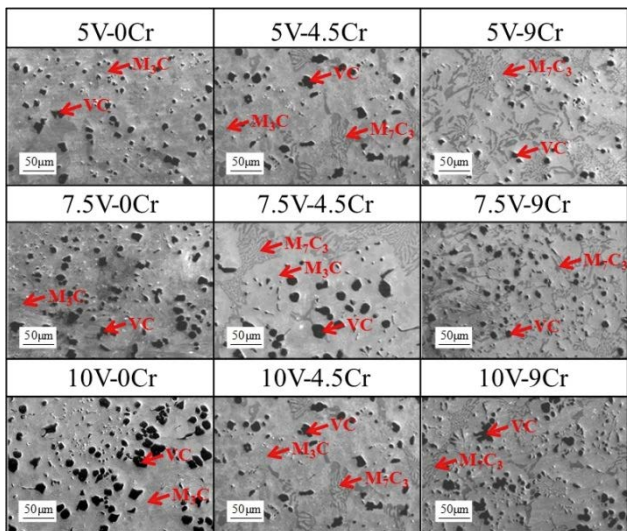
	Hardness, HV1
5V-0Cr	566
7.5V-0Cr	552
10V-0Cr	510
5V-4.5Cr	575
7.5V-4.5Cr	601
10V-4.5Cr	523
5V-9Cr	500
7.5V-9Cr	508
10V-9Cr	499

3.3 EDS による金属表面の面分析

Fe-C-Mn-Cr-V 系多合金鑄鉄の面分析結果を Fig. 4 に示す. V と C の反応が顕著であることから, 球状の炭化物はバナジウム炭化物である. また, 針状もしくはラメラ状の炭化物では, Fe, Cr および C の反応が見られることから, 複合炭化物と判断できる.



(a) EDS analysis of 5V with 0, 4.5, and 9 mass%Cr.

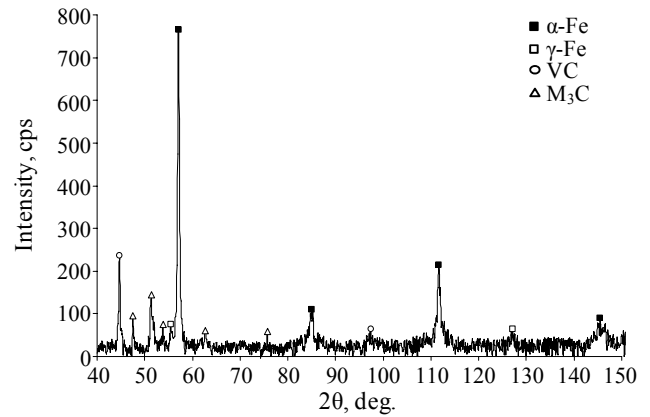


(b) SEM photographs of specimens.

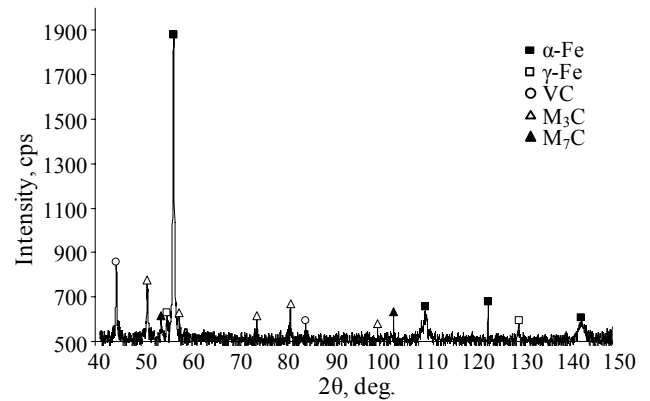
Fig. 4 EDS analysis and SEM images of specimens.

3.4 XRD 回折による基底組織および炭化物の同定

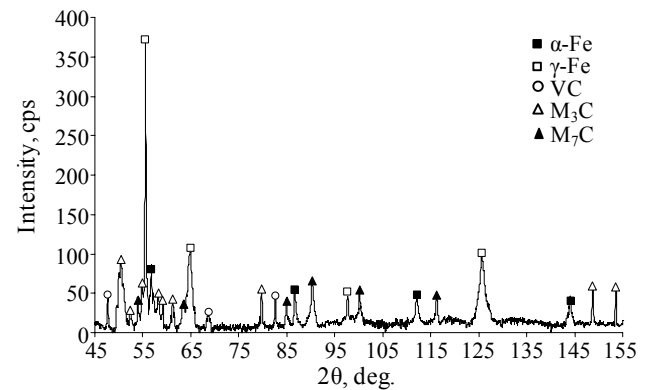
5V-0Cr, 5V-4.5Cr および 5V-9Cr の X 線回折結果を Fig. 5 に示す. 5V-0Cr では VC, Cr_3C , 5V-4.5Cr および 5V-9Cr では VC, Cr_3C および Cr_7C_3 が確認された. また, 基底組織は硬さおよび組織観察の結果から, Cr 含有量が 0%の供試材ではパーライト, Cr 含有量が 4.5%の供試材ではパーライト+オーステナイト, Cr 含有量が 9%の供試材ではオーステナイトである.



(a) 5V-0Cr



(a) 5V-4.5Cr



(a) 5V-9Cr

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of 5V with 0, 4.5, and 9 mass% Cr.

3.5 摩耗試験結果

供試材のエロージョン摩耗試験結果を Fig. 6 に示す。5V, 7.5V, 10V の供試材全てにおいて Cr 含有量の増加に伴い、損傷速度および衝突角度依存性が小さい。中でも、5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr は同程度の耐摩耗性を示し、17Cr の約 2 倍の耐摩耗性を示した。5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr の損傷速度が同程度の値となったことから、本鋳鉄系において V 含有量を 5% まで低減可能である。しかしながら、5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr と 17Cr 硬さの差は最大で約 100HV50 であり、損傷速度に差が生じた要因とは考え難い。そこで炭化物の面積率測定、摩耗試験後の硬さを測定した。

4 考 察

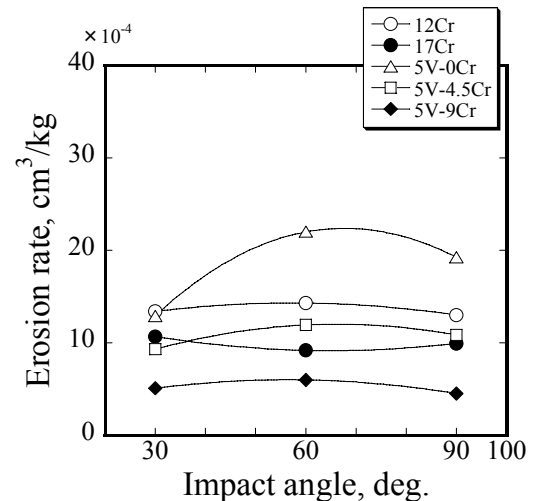
4.1 炭化物の面積率測定

各供試材の炭化物の面積率を測定した。その結果を Fig. 7 に示す。炭化物の面積率は Cr 含有量の増加に伴い、増加傾向を示したが、V 含有量では大きな差は見られない。炭化物の面積率は Cr 含有量 0% の供試材では約 18%, Cr 含有量 4.5% の供試材では約 23%, Cr 含有量 9% の供試材では約 27% であった。また比較材の 12Cr では約 28%, 17Cr では 30% であった。

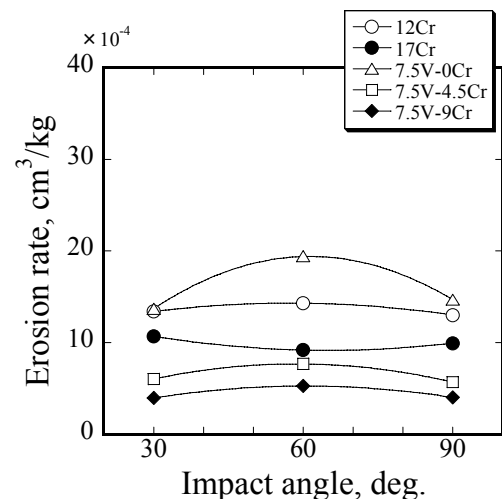
4.2 摩耗面近傍の硬さ測定

前節では、V および Cr 含有量を変化させた多合金鋳鉄の損傷速度および衝突角度依存性を抑えた要因には至らなかった。そこで基地組織に着目し、各供試材の摩耗表面近傍の断面硬さを測定した。各供試材の摩耗表面近傍の断面硬さを Fig. 8 に示す。オーステナイト基地を有した 5V-9Cr, 7.5V-9Cr, 10V-9Cr は 500HV1 から約 720HV1 硬さが増加している。この硬さ増加の要因として基地組織中に残留オーステナイトが存在し、その残留オーステナイトが粒子衝突により加工誘起変態し、マルテンサイト化したことが推察できる。

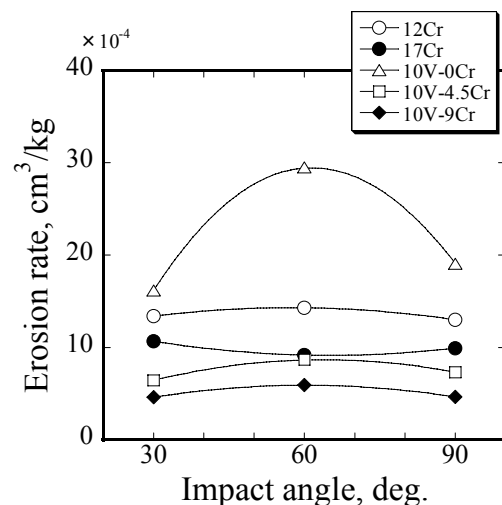
このことから 5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr は残留オーステナイトが加工誘起変態し、マルテンサイト化したことで硬さが増加し、摩耗表面の塑性変形を抑えたことで損傷速度および衝突角度依存性が小さくなったと推察できる。



(a) 5V with 0, 4.5, and 9 mass% Cr.



(b) 7.5V with 0, 4.5, and 9 mass% Cr.



(c) 10V with 0, 4.5, and 9 mass% Cr.

Fig. 6 Erosion rate vs. impact angle of specimens.

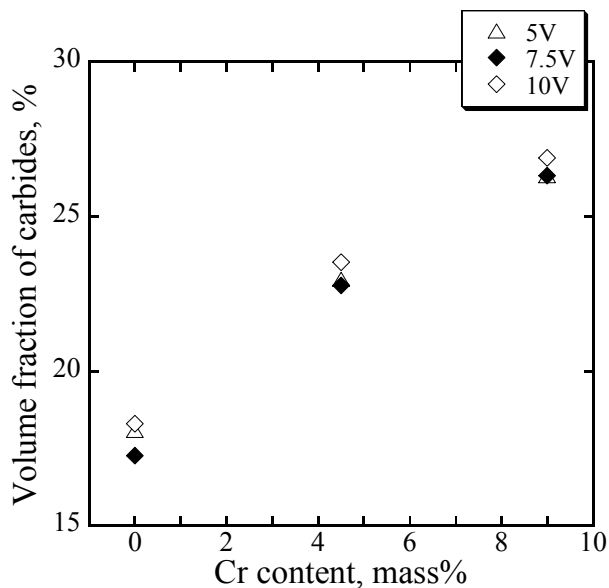


Fig. 7 Volume fraction of carbides vs. Cr content of specimens.

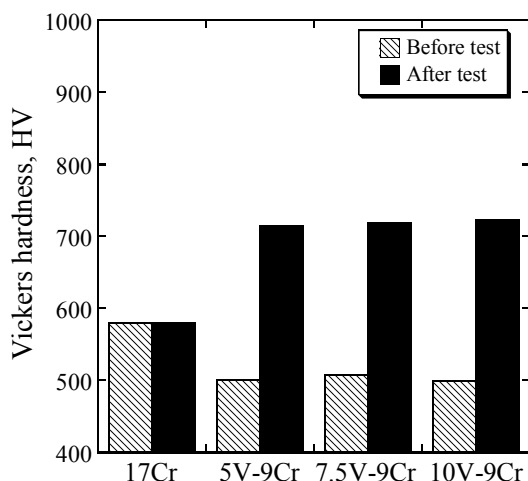


Fig. 8 Vickers hardness changes before and after erosive wear tests of specimens.

5 おわりに

本研究では、高価な Fe-V の添加量を減らし、比較的安価な Fe-Cr の添加量を増やすことで、高クロム鋳鉄と同程度の製造コストで優れた耐エロージョン摩耗特性を示す材料の開発を行った。その結果を以下に要約する。

(1) 5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr が優れた耐摩耗性を示した。これは、基地組織中の残留オーステナイトが粒子衝突により加工誘起変態し、硬さが増加したためである。

(2) 5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr は複数の炭化物形成元素を添加することで、1 種類の炭化物形成元素を添加した 17Cr より 2 倍優れたエロージョン摩耗特性を示した。このことから、複数の高硬度な炭化物を晶出および析出させることは、耐摩耗性向上に寄与することが示唆された。

(3) 5V-9Cr, 7.5V-9Cr および 10V-9Cr が同程度の耐摩耗性を示したことから、高価なフェロバナジウムの添加量を 5% まで低減可能であり、比較的安価なフェロクロムの添加量を増やすことで、製造コストの削減が可能である。

文 献

- 1) JOGMEC データベース
- 2) V.G. Efremenko, K. Shimizu, A.P. Cheiliakh, T.V. Kozarevs'ka, Yu.G. Chabak, H.Hara, K. Kusumoto, Friction and Wear, 34, (2013), pp.466.
- 3) X. Yaer, K. Shimizu, H. Matsumoto, T. Kitsudo and T. Momono, Wear, 264, (2008), 947.
- 4) T. Otomo, K. Shimizu, Proc. of Materials Science, Metal and Manufacturing, Singapore, (2012), 84.
- 5) X. Yaer, K. Shimizu, T. Momono, H. Matsumoto, T. Kitsudo, J. JFS, 78, (2006), 510.
- 6) I. Finnie, Wear, 3, (1960), 87.